

분자 자성체의 자기 특성과 양자역학적 효과

장지훈*

국민대학교 자연과학대학 테크노과학부 나노 전자물리전공
서울특별시 성북구 정릉동 861-1 136-702

(2004년 3월 19일 받음, 2004년 4월 7일 최종수정본 받음)

자성의 양자 역학적 터널 효과의 발견 이후 학술적 관심이 증대된 분자 자성체의 자기적 성질과 양자역학적 효과에 대하여 고찰하였다. 분자 자성체는 유기물 골격 구조 안에 자성 이온이 일정한 구조를 가지고 배열되어 있는 금속-유기물 분자로서, 동일한 구조를 가지는 분자들 간의 자기적 상호작용이 매우 작은 분자들이 거대한 분자-결정을 형성하고 있다. 이러한 이유로 기존의 자성 물질에 비해서 많은 특이한 성질들을 가지고 있는데 특히 거시적 측정의 결과가 미시적인 특성, 즉, 분자의 자기적 성질을 그대로 보여 준다는 점은 매우 흥미롭다. 분자 자성체의 자성에 대해 고찰함에 있어서 미시적인 연구 방법인 핵자기 공명법을 이용한 연구들에 중점을 두고 고찰하였다. Mn12-ac에서 발견된 자성의 양자적 터널 현상을 핵자기 공명법으로 관측하는 방법에 대하여 연구하였고 그것을 이용한 양자역학적 터널 현상에 대한 미시적 연구도 고찰하였다. 또한 분자 자성체에서 핵자기 공명법으로 처음으로 발견된 레벨간의 교차효과도 그 물리적 의미를 실험 결과들을 가지고 고찰하였다. 이러한 분자 자성체 대한 연구는 향후 응용분야에서 필요할 자기 기억 소자의 크기의 한계에 대한 정보를 줄 수 있고, 양자 컴퓨터에의 응용에 필요한 기초 지식을 제공할 것이다. 학술적인 면에서는 지금까지 잘 이해되지 않고 실험적으로 검증이 되지 않았던 많은 양자역학적 이론들의 실험적 검증이 가능할 것이다.

주제어 : molecular nanomagnet, macroscopic quantum tunneling of magnetism, nuclear magnetic resonance, quantum level crossing effect, metal-organic material

I. 서 론

근래의 분자 자성체(Molecular nanomagnet)의 하나의 Mn12-ac에서 Macroscopic Quantum Tunneling of Magnetization 이 발견된 이후[1, 2]로 분자 자성체에 대한 학술적 관심이 많아졌고 이후로 많은 연구가 이루어졌다. 분자 자성체에서의 양자적 특이 현상의 발견은 물리학계의 많은 학술적 관심을 끌었고 분자 자성체를 화학의 한 분야에서 물리학 및 여타 과학 분야의 공통의 연구 대상으로 만들었고 동시에 분자 자성체의 실용적 응용에 대한 관심도 증대 시켰다.

분자 자성체는 일반적으로 유기 골격 구조 안에 자성 이온이 규칙적인 구조를 가지고 배열되어 있는 형태를 이루고 있다. 대부분의 경우, 분자 자성체의 각각의 분자들 사이의 상호 작용은 매우 작은 것 ($J < 10$ mK)으로 알려져 있고 같은 결정내의 각각의 분자들은 서로 자기적으로 독립되어있다고 할 수 있다. 그리고 각각의 분자들은 화학적으로 동일한 구조를 가지고 있다고 알려져 있다. 따라서 거시적인 측정의 결과도 단일 분자의 ensemble의 특성의 측정 결과를 보여준다. 이러한 성질은 기존의 bulk 소재의 물질에서 전혀 찾을 수 없는 특이한 형태의 성질이다. 이러한 성질들은 분자 자성체가 이상적인 물리 실험실이 될 수 있게 하고, 특히 다체계(few body system)에 대한 연구 대상으로서 분자 자성체를 유용하

게 만든다. 분자 자성체는 그 합성에 대한 연구의 역사가 매우 오래되어서 지금까지 알려진 합성 가능한 분자의 종류가 매우 많다. 구조적으로도 다양하고(ring, cluster, plane, 등), 한 분자 내에 존재하는 자성 이온의 개수에 따라서도 많은 종류가 있으며 분자내의 자성 이온들 사이의 상호작용의 세기와 종류도 다양하다. 이러한 분자 자성체의 다양함은 여러 가지 물리 현상들을 실험하고 새로운 이론들을 검증하기에 매우 좋은 연구 대상을 제공해준다[3].

분자 자성체가 가지는 이러한 특징들 만이 분자 자성체를 물리학계의 관심을 끈 것이 아니다. 오히려 이러한 분자 자성체의 특징들 보다 분자 자성체만이 보여주는 새로운 물리 현상들이 보다 더 학술적으로 흥미로운 것이다. 특히 분자 자성체에서 최초로 발견된 자성의 양자역학적 터널 효과는 그 현상이 가지는 학술적 의미뿐만 아니라 실제의 응용, 특히 자기 기억 소자의 기록 유지를 위한 크기의 한계에 대한 물리학적 기초 지식의 제공, 양자 컴퓨터에의 응용 등 여러 가지 응용 면에서도 매우 중요한 의의를 가진다.

본 연구 보고서에서는 분자 자성체에 대해서 이루어진 여러 가지 연구 결과들에 대해서 정리, 고찰하고 향후의 예상되는 연구들에 대해서 논의하고자 한다.

II. Mn12-ac에서의 자성의 양자 터널 효과

자성의 양자적 터널 효과는 오래 전부터 이론적으로 예상

*Tel: (02) 910-4768. E-mail: zeehoj@kookmin.ac.kr

되어왔다[4]. 하지만 실험적으로 자성의 양자적 터널 현상이 최초로 관측된 것은 근래의 일이다[1, 2]. 분자 자성체의 한 종류인 Mn12-ac에서 최초로 자성의 양자적 터널 현상이 발견된 이후로 그 현상에 대한 많은 실험적 이론적 연구가 이루어 졌다[5-10]. 지금까지 Mn12-ac에 대한 연구에 의하면 이 분자 자성체에서의 자성의 양자적 터널 현상은 순수한 양자적 현상이 아닌 열적 여기 작용(thermal excitation)에 의해서 도움을 받는 터널 현상으로 밝혀졌고 이것은 순수한 양자적 터널 현상을 보여주는 다른 분자 자성체인 Fe8의 경우와 다르다는 것이 알려졌다[11, 12]. 하지만 양자적 터널 현상의 공통적인 이유로는 전체 Hamilton과 교환이 성립하지 않는 transverse field의 영향이라는 것이 많은 이론적/실험적 연구들로 밝혀졌다. 현재 이러한 양자적 터널 효과를 일으키는 transverse field의 원인으로는 분자 자성체 결정내의 분자들의 미세한 비동일성, 핵의 자기 모멘트의 영향, 분자들 사이의 dipolar field등이 거론되고 있으나 가장 최근의 연구 결과에 따르면 분자들 내에 존재하는 여러 가지 isomer들에 의한 것으로 추정된다.

지금까지의 실험적 연구는 주로 MPMS를 이용한 거시적 자성 측정을 통해서 이루어 졌다. 특히, 저온에서 자기 모멘트의 이완 현상(relaxation)의 특정 시간(characteristic time)이 매우 길다는 것이 알려진 이후로 MPMS를 이용한 거시적 자성의 연구가 실험적 연구의 주요한 방법이 되어 왔다[5, 6]. 가끔 비열 측정이나 미세 자기 토크 측정법 등이 쓰이기는 하지만 다른 bulk 소재의 물질들에 비해서 분자 자성체의 경우에는 그 연구가 일천하다고 할 수 있다.

MPMS를 이용한 거시적 자성 측정법으로 자성의 양자적 터널 현상이 관측된 이후로 다른 많은 실험적 방법으로 양자적 터널 현상이 관측되었다. 미세적 실험방법인 핵자기 공명법을 이용하여서도 양자 터널 효과를 관측하였으나 기존에 알려진 고전적인 핵자기 공명법이 아닌 새로운 실험 방법을 통하여서 이루어 졌다[13]. 기존의 핵자기 공명법의 경우에는 평행 상태에서의 NSLR(Nuclear spin lattice relaxation rate)의 측정을 통한 것이 일반적이었으나 참고문헌[13]에서 기술하는 방법은 비 평행 상태에서의 핵자기 공명 신호 크기의 시간에 따른 변화를 측정하는 것으로 핵자기 공명법의 새로운 기법을 개발한 것이다. 먼저 외부 자기장을 걸지 않은 상태에서 시료의 온도를 낮추어서 S=10 기저 상태의 자기 비등방성(magnetic anisotropy)에 따른 자기 에너지의 쌍우물(double well) 양쪽에 같은 정도의 분자가 존재하게 만든 다음, 특정한 크기의 외부 자기장을 걸어서 핵자기 공명 스핀 에코(spin echo) 신호의 크기를 시간에 따라서 측정해 나가면 핵이 존재하는 곳의 국소 자기장의 크기 변화의 시간에 따른 미분치가 측정 된다. 양성자의 핵자기 공명 실험 결과를 분

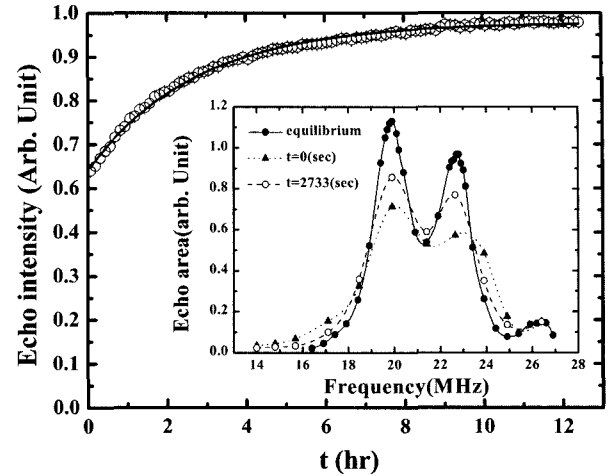


Fig. 1. Spin echo signal intensity change as a function of time after the magnetic field is turned on (typical case). Inset: NMR spectrum change as a function of time.

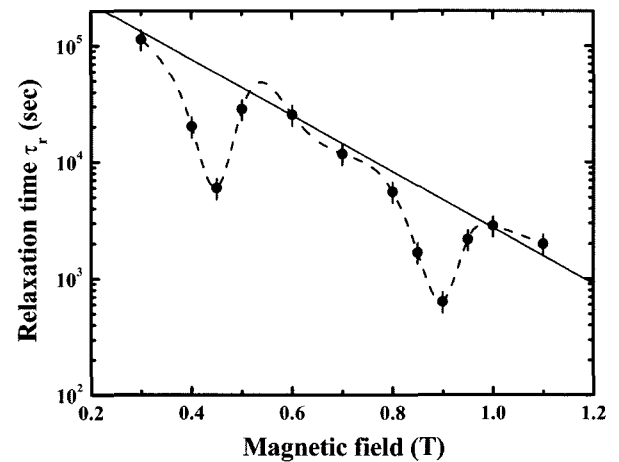


Fig. 2. The relaxation time τ_r as a function of external field. The relaxation time was measured with new NMR method described in the context. The dotted line is only guide to the eye.

석하여 보면 양성자의 국소 자기장의 변화는 시료 전체의 자기 모멘트의 변화와 동일한 형태의 변화를 보여 주는 것을 알 수 있다. 그림 1에 핵자기 공명 신호의 시간에 따른 변화의 대표적인 결과를 보였다.

또한 이렇게 측정된 핵자기 공명 신호의 시간에 대한 변화가 거시적 자기 모멘트의 경우에서와 같이 exponential적 행동을 보임에 따라 특정 시간(characteristic time)을 측정할 수 있고 이렇게 측정된 특정 시간들을 외부 자기장의 세기에 따라 정리하여 그리면 다음 그림 2에서와 같이 양자적 터널 효과가 있다고 알려진 공명 자기장의 세기(resonance field strength)에서 특정시간이 짧아짐을 알 수 있다.

공명 자기장에서 특정시간(characteristic time)이 양자적 터널 효과에 의해서 짧아 지는 것은 다음과 같이 이해 할 수

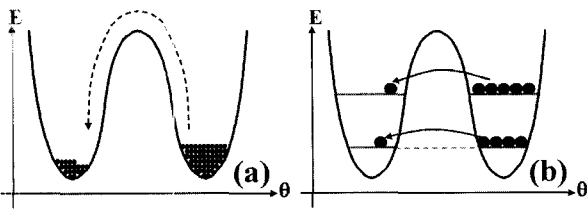


Fig. 3. (a) Magnetization relaxation with thermal process. (b) Magnetization relaxation due to quantum tunneling.

있다. 양자적 터널 효과가 없는 고전적인 경우에서의 자성의 이완 현상은, 비등방성 쌍우물의 경우, 그림 3(a)에서와 같이 쌍우물을 만드는 자성 비등방성 에너지 장벽보다 높은 에너지의 열적 여기 현상(thermal relaxation)에 의한 것이다. 양자적 터널 효과가 자성의 이완 현상에 영향을 주는 경우에는 그림 3(b)에 보인 대로 에너지 장벽 양쪽의 에너지 레벨들이 축퇴되어서 쌍우물의 한쪽에서 다른 쪽으로 에너지 장벽을 뚫고 자성이 이동하게 된다(분자의 자성의 방향이 바뀌게 된다). 이러한 양자적 터널 현상은 단순히 에너지 장벽 양쪽의 에너지 레벨이 일치하는 것으로만 발생하지 않고 분자의 자성 에너지를 기술하는 헤밀토니안에 장벽 양쪽의 에너지 레벨들 사이에 mixing을 일으키는 항이 존재해야 한다. 이러한 장벽을 통과하는 양자적 터널 현상이 있는 경우에는 에너지 장벽위로의 열적 여기 현상에 의한 자성의 이완 현상에 비해서 빠른 이완 현상이 일어난다. 그림 2에서 보이는 자성 이완 특정 시간(characteristic time of magnetization relaxation)의 극소점들은 양자적 터널 현상으로 이해를 할 수 있다.

핵자기 공명법을 이용한 자성의 이완 현상 실험 결과는 이전에 알려진 MPMS를 이용한 거시적 자성 측정 결과와 매우 잘 일치하고 다른 실험 방법인 비열 측정 등에 비해서 실험이 간단하고 실험 결과가 매우 균일하여서 앞으로 많은 응용 가능성을 내포하고 있다. 특히 핵자기 공명법을 사용하였으므로 미시적으로 양자적 터널 효과를 연구할 수 있는 주요한 연구 방법이라고 할 수 있다. 실제로 이 실험 방법을 응용한 연구가 많이 이루어져 왔다[14-17]. 특히 같은 실험 방법을 ^{55}Mn 핵자기 공명에 응용한 연구[참고문헌 17]는 자성 이온의 자기 모멘트의 시간에 따른 이완 현상을 직접 관측한 것으로서 매우 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

핵자기 공명법은 probe nuclei가 존재하는 곳의 국소 자기장의 정적/동적인 변화에 대한 물리적 연구를 가능하게 하는 실험 방법이다. 핵자기 공명법을 이용한 연구에서 자성 이온 핵의 핵자기 공명 신호를 이용한 연구가 보다 직접적인 자성 연구 방법이라는 것은 자명하다. 특히 Mn12-ac의 경우에는 분자내의 자성 이온 핵, ^{55}Mn 핵을 이용한 연구가 많이 진행되었다[17-20]. ^{55}Mn 핵을 이용한 연구에서 밝혀진 중요한 사실은 외부 자기장의 세기가 15T일 때까지 기존에 알려진

Mn12-ac 내부의 자기적 구조(Mn $^{4+}$ 이온의 자기모멘트가 Mn3+의 자기 모멘트의 반대 방향으로 정렬되어서 S=10의 기저 상태를 이룬다는 것)가 유지된다는 것이다. 또한 ^{55}Mn 핵의 핵자기 공명 신호의 크기가 비 평형 상태에서 변화하는 것을 통하여 자성의 양자역학적 터널 효과도 관측되었고 특히 기존에 알려진 것(e^{\pm} 의존성)과 다르게 짧은 시간에서는 \sqrt{t} 의존성이 있음을 밝혔다[17].

양자역학적 터널 효과에서 두 개의 축퇴된 레벨들 사이에서 정의되는 tunneling splitting Δ_T 가 각각의 레벨들의 선포(δ)보다 매우 큰 경우에는 결맞는(coherent) 터널 효과가 주로 생기고 tunneling splitting δ_T 가 선포(δ)보다 매우 작은 경우에는 터널 현상에서 decoherence 효과가 생겨서 주로 thermally assisted tunneling만 가능하게 된다. Tunneling splitting은 이론적으로 계산이 가능하지만 선포(δ)에 대한 정보는 실험적으로 얻을 수 밖에 없다. 이러한 선포에 대한 정보는 양자역학적 터널 효과의 성질에 대한 연구에 있어서 필수적으로 요구되는 기본적인 물리 상수로서 매우 중요하데 이러한 선포에 대한 정보를 양성자 핵자기 공명법을 이용하여 구하였다[21]. 이러한 선포(δ)에 대한 연구도 또한 ^{55}Mn 핵을 이용하여 수행되어 왔는데 참고 문헌[21]에서 제안된 spin-phonon interaction에 의한 선포의 넓어짐 효과가 있음이 밝혀졌다[18, 20]. Mn12-ac 내부의 자기장 방향에 수직인 방향으로 외부 자기장을 가하여 핵자기 공명법을 수행한 결과에서는 자기 이온(Mn 이온)의 자기 모멘트가 양자화 축에 비해서 기울어져 있다는 것(spin canting)을 알게 되었다. Mn12-ac의 비등방성 축(anisotropy axis)에 수직인 방향으로 외부 자기장을 가해지는 경우의 NSLR(Nuclear-spin-lattice-relaxation-rate)의 측정결과는 비등방성 축(anisotropy axis)과 동일한 방향으로 외부 자기장을 가하는 경우와 다르게 spin-phonon interaction에 의한 각각의 레벨들의 선포의 넓어짐만으로 설명할 수 없고 상기한 자기 모멘트의 기울어짐 효과를 동시에 고려하였을 때 잘 설명이 된다. 또한 저온에서 성립하는 것으로 잘 알려진 S=10 기저 상태의 스핀 구조가 바뀌지 않고 외부 자기장에 반응하여 분자의 자기 구조가 통째로 회전한다는 것을 ^{55}Mn 핵자기 공명 스펙트럼으로부터 알 수 있다.

III. 원형구조의 분자 자성체에서의 레벨 교차 효과 (level crossing effects)

지금까지 level-crossing의 물리학에 대한 연구는 잘 이루어지지 않았다. 지금까지 물리학에서 연구된 계에서는 그러한 잘 정의된 level들의 교차 현상이 잘 나타나지 않았고 그 이유는 연구 대상이 된 거의 모든 물질들이 infinite system이어서 에너지 레벨보다는 에너지 밴드를 보여주는 것이 일반적이

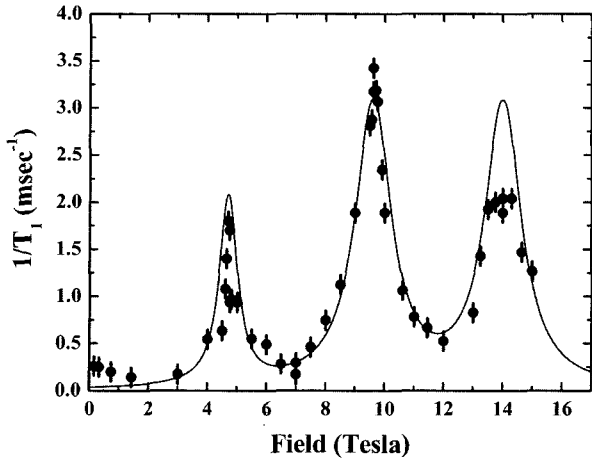


Fig. 4. $1/T_1$ of Fe10 molecule as a function of external magnetic field at $T=1.5K$.

기 때문이다. 따라서 level-crossing에서의 물리학은 잘 연구되지 않은 분야이었다. 하지만 앞에서 기술한 분자 자성체들의 성질들로 인하여 분자 자성체의 경우에는 에너지 밴드가 아닌 에너지 레벨들이 잘 정의되어서 이러한 연구가 가능하다. 분자 자성체 중 하나인 Fe10 ($Fe_{10}(OCH_3)_{20}(O_2CCH_2C_1)_{10}$)에서의 자성 에너지 레벨들의 교차 현상을 양성자 핵자기 공명법을 이용한 분석이 행하여졌다[22]. 이러한 level-crossing 현상에 대한 연구 결과로 중요한 것은 저온에서의 측정된 NSLR (Nuclear-spin-lattice-relaxation-rate), 즉 $1/T_1$ 이 level-crossing 조건에서 매우 커진다는 것이다. 그림 4에서, 저온에서 외부 자기장의 세기에 따른 $1/T_1$ 의 변화에서 level-crossing이 생기는 크기의 외부 자기장이 가해지는 경우 $1/T_1$ 는 매우 커져서 peak를 형성함을 알 수 있다.

저온에서 그리고 고 자기장이 걸리는 경우에는 $1/T_1$ 이 거의 온도에 따라 변하지 않는다(그림 5 참조). 이러한 온도 변화에 무관함은 그림 4에 보여진 level-crossing field에서 이 peak의 원인이 spin-gap에 의한 것이 아니라는 것을 시사한다. 하지만 저 자기장($H < 4T$)에서는 spin-gap에 의한 온도 변화를 보여주고 있다.

이러한 현상들을 설명하기 위하여 Nuclear spin Zeeman reservoir와 magnetic molecular Zeeman reservoir사이의 cross relaxation 모델이 제안되었다[22]. 이 모델은 상기한 실험 결과들을 정성적으로 설명할 수 있으나 몇 가지 문제가 존재한다. 먼저 cross relaxation은 $\eta\omega_n = \eta\gamma_n H = g\mu_B H - H_c$ 라는 조건이 성립할 때만 이루어진다(이식에서 γ_n 은 nuclear Larmor frequency이고, γ_n 은 nuclear gyromagnetic ration이고, H_c 은 level crossing에 해당하는 자기장의 세기를 말한다). 이 조건에 따르면 한 번의 level crossing에 대하여 두 번의 cross relaxation 현상이 생겨야 한다. 또한, 두 개가 아닌 한 개의

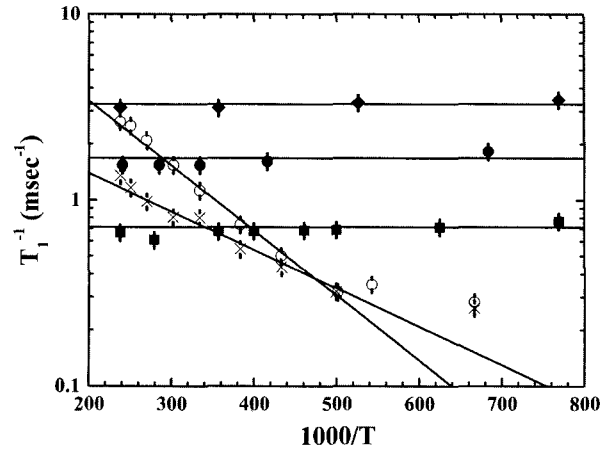


Fig. 5. Temperature dependence of $1/T_1$ of Fe10.

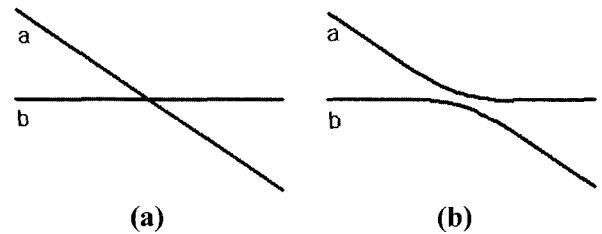


Fig. 6. a) level crossing b) anti-level-crossing by level repulsion.

cross relaxation에 해당하는 peak를 설명하기 위해서 도입되어야 하는 선평의 늘어남은 물리적으로 설명되지 않을 만큼 크다. 이러한 분석 결과들은 결국 level crossing 조건 부근에서 서로의 level들이 anti-level crossing을 하게 되어서 두 개의 level이 교차하더라도 0이 아닌 energy gap이 존재함을 의미한다. 다음 그림에서 단순한 level crossing과 anti-level crossing의 차이를 보였다.

이러한 차이점에 대한 분석을 위하여 분자 자성체의 하나인 Fe6:Li($[LiFe_6(OCH_3)_{12}(dbm)_6]B(C_6H_5)_4-5CH_2Cl_2$)의 single crystal을 가지고 초저온 비열 측정, 미세 자기 토크 측정 등을 이용한 연구가 수행되었다[23]. 초저온 비열 측정의 결과는 level crossing에서 두 개의 peak를 보여주며, 0이 아닌 비열 값을 보여 주고 있다[23]. Two-level Schottky anomaly의 경우 두 level들 사이의 에너지 차이가 0이면 비열도 0이 되어야 하는데 측정된 결과는 level crossing에서 0이 아니라는 점이다(level-crossing 모델의 경우 선평이 늘어나면 비열이 0이 되지 않을 수 있으나 그러한 모델을 가지고 이론적 계산된 결과가 실험 결과를 설명할 수 없음이 알려졌다[23]). 이것은 두 level이 교차하는 경우에 level들 사이에 repulsion이 생겨서 anti-level crossing이 생긴다는 것을 의미한다. 또한 anti-level crossing 모델과 초저온 비열 측정 결과로부터 유도되는 물리 상수들을 가지고 미세 자기 토크 측정 결과와 핵자기 공명법의 $1/T_1$ 결과들을 잘 설명할 수 있음은 두

level이 교차하는 경우에는 anti-level crossing이 생긴다는 것을 보여준다.

IV. 결론과 전망

분자 자성체는 새로이 발견된 물질은 아니지만 양자역학적 터널 현상의 발견 이후 물리학계의 많은 관심을 끌고 있고 양자역학의 근본적인 문제들(coherence, decoherence, Berry's phase[24], mixed states at the level crossing, tunneling mechanism, 등)에 대한 해답을 줄 수 있으리라 예상된다. 현재 많은 연구가 이루어 지고 있으나 지금까지 행하여진 대부분의 연구들은 학술적인 관심에 기초한 것이다. 현재까지의 연구들은 주로 거시적 실험 방법을 이용한 것들이 많았으나 이 연구 보고서에는 미시적 실험 방법인 핵자기 공명법을 이용한 연구 결과들을 중심으로 현재까지의 연구 결과들을 정리하였다. 현재까지의 연구 결과들 중 핵자기 공명법으로 양자 역학적 터널 효과를 감지하는 방법은 양자역학적 터널 효과를 미시적으로 측정하기 위한 기초실험으로서 중요한 의미를 가지며 앞으로 수행될 다른 연구들의 기초가 될 것이다. 또한 핵자기 공명법으로 처음으로 확인된 레벨의 교차시에 생기는 anti-level-crossing 효과는 지금까지 이론적으로만 알고 있던 물리적 지식을 실험적으로 검증하였다는 점에서 매우 중요한 의의를 가진다. 이러한 anti-level-crossing에 대한 연구는 향후 중요해질 coherence/decoherence 문제들에 대한 해답을 줄 수 있으리라 생각된다.

이러한 분자 자성체에 대한 연구들은 앞으로도 계속 진행이 될 것이지만 이제까지의 연구와는 다른 방향으로 진행될 가능성이 많다. 지금까지의 연구가 순수한 학술적인 동기에서 수행되었다면 앞으로는 응용에 중점을 둔 연구도 수행이 되리라 예상된다. 특히 비등방성이 크고 전체의 스핀값이 크고 내부의 상호작용의 크기가 큰 분자 자성체가 새로이 합성이 된다면 자기 기억 소자로서의 응용이 가능할 것이다. 또한 빛의 영향을 받아서 자기적 성질이 바뀌는 분자 자성체들은 향후 optical switch등에 응용이 가능할 것이고, 양자역학적 터널이 일어나는 계 중에서 레벨들의 선풍이 tunneling splitting보다 작은 계의 경우에는 coherent tunneling을 이용한 양자 컴퓨터의 실현도 예상해 볼 수 있다. 이외에도 많은 응용 가능성을 가지고 있는 분자 자성체는 향후 연구의 결과에 따라서는 21세기의 새로운 기술 혁명의 기반이 될 수 있다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 “2003년도 국민대학교 교내 연구지원금으로 수

행된 연구”임을 알려 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] L. Thomas, F. Lioni, R. Ballou, D. Gatteschi, R. Sessoli, and B. Barbara, *Nature (London)* **383**, 145(1996).
- [2] J. R. Friedman, M. P. Sarachik, J. Tejada, and R. Ziolo, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3830 (1996).
- [3] *Molecular Magnetism*, Olivier Kahn, (VCH New York, 1993).
- [4] *Quantum Tunneling of Magnetization*, edited L. Gunter and B. Barbara (Kluwer, Dordrecht, 1995).
- [5] R. Sessoli, D. Gatteschi, A. Caneschi, and M. A. Novak, *Nature (London)* **365**, 141(1993).
- [6] J. Villain, F. Hartmann-Boutron, R. Sessoli, and A. Pettori, *Europhys. Lett.* **27**, 159(1994).
- [7] P. Politi, A. Rettori, F. Hartmann-Boutron, and J. Villain, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 537(1995).
- [8] E. M. Chudnovsky and J. Tejada, *Macroscopic Quantum Tunneling of Magnetic Moment* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- [9] F. Hartmann-Boutron, P. Politi, and J. Villain, *Int. J. Mod. Phys. B* **10**, 2577(1996).
- [10] I. Tupitsyn, N. V. Prokofev, and P.C.E. Stamp, *Int. J. Mod. Phys. B* **11**, 2901(1997).
- [11] C. Sangregorio, T. Ohm, C. Paulsen, R. Sessoli, and D. Gatteschi, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 4645(1997).
- [12] W. Wernsdorfer and R. Sessoli, *Science* **184**, 133(1999).
- [13] Z. H. Jang, A. Lascialfari, F. Borsa, and D. Gatteschi, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 2977 (2000).
- [14] Y. Furukawa, K. Watanabe, K. Kumagai, Z. H. Jang, A. Lascialfari, F. Borsa, D. Gatteschi, *Phys. Rev. B* **62**, 14246(2000).
- [15] T. Goto, T. Kubo, T. Koshiha, Y. Fujii, A. Oyamada, J. Arai, K. Takeda, and K. Awaga, *Physica B* **284-288**, 1227(2000).
- [16] T. Kubo, T. Koshiha, T. Goto, A. Oyamada, Y. Fujii, K. Takeda, and A. Awaga, *Physica B* **294-295**, 310(2001).
- [17] T. Kubo, T. Goto, T. Koshiha, K. Takeda, and A. Awaga, *Phys. Rev. B* **65**, 224425 (2002).
- [18] Y. Furukawa, K. Watanabe, K. Kumagai, F. Borsa, D. Gatteschi, *Phys. Rev. B* **64**, 104401(2001).
- [19] Y. Furukawa, K. Watanabe, K. Kumagai, F. Borsa, T. Sasaki, N. Kobayashi, D. Gatteschi, *Phys. Rev. B* **67**, 64426(2003).
- [20] Takao Goto, Takeshi Koshiha, Takeji Kubo, Kunio Awaga, *Phys. Rev. B* **67** 104408(2003).
- [21] A. Lascialfari, Z. H. Jang, F. Borsa, P. Carretta, and D. Gatteschi, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3773(1998).
- [22] M.-H. Julien, Z. H. Jang, A. Lascialfari, F. Borsa, M. Horvatic, A. Caneschi, and D. Gatteschi, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 227(1999).
- [23] M. Affronte, A. Cornia, A. Lascialfari, F. Borsa, D. Gatteschi, J. Hinderer, M. Horvatic, A. G. M. Jansen, and M.-H. Julien, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 167201(2002).
- [24] W. Wernsdorfer, R. Sessoli, *Science*, **284**, 133(1999).

The Magnetic Properties and Quantum Effects of Molecular Nanomagnets

Zeehoon Jang*

*Dept. of Techno Science, College of Natural Sciences, Kookmin Univ.
861-1, Chongnung-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-702, Korea*

(Received 19 March 2004, in final form 7 April 2004)

Magnetism of molecular nanomagnet, which attracted a lot of academic attention after the discovery of the macroscopic quantum tunneling of magnetism, is reviewed. Molecular nanomagnet is metal-organic material in which magnetic ions are regularly located in the organic skeleton. Also, the interaction between the molecules is very small and those molecules form macroscopic molecular crystal in which molecules are residing at the element points in the crystal. Molecular nanomagnets show a lot of interesting features, especially, equivalence of macroscopic magnetic properties and molecular magnetic properties. In this paper, research results on molecular nanomagnet with microscopic tool like NMR are reviewed mainly. The new method to observe the quantum tunneling of magnetization discovered in Mn₁₂-ac with NMR is shown and the research results on the microscopic aspects of the macroscopic quantum tunneling of magnetization using the new method are shown. Also, the physical aspect of the level crossing effect which has been reported originally with NMR in molecular nanomagnet is reviewed with experiment results. The research results on the molecular nanomagnets will reveal the important information about the limit of the miniaturization of magnetic memory units and give us the basic scientific knowledge which is needed for the application for the quantum computation. Moreover, academically, many quantum mechanical theories which have not been checked the validity can be checked with experiments.

Key words : molecular nanomagnet, macroscopic quantum tunneling of magnetism, nuclear magnetic resonance, quantum level crossing effect, metal-organic material